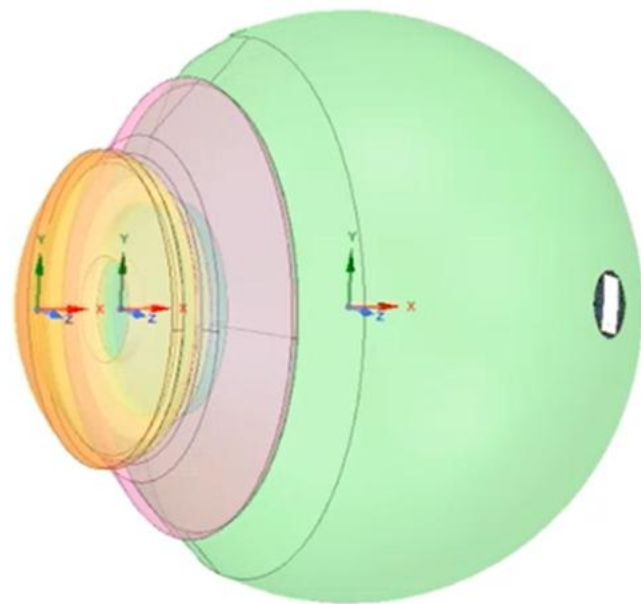


人类视觉仿真超级引擎

Human Virtual Simulate Super Engine

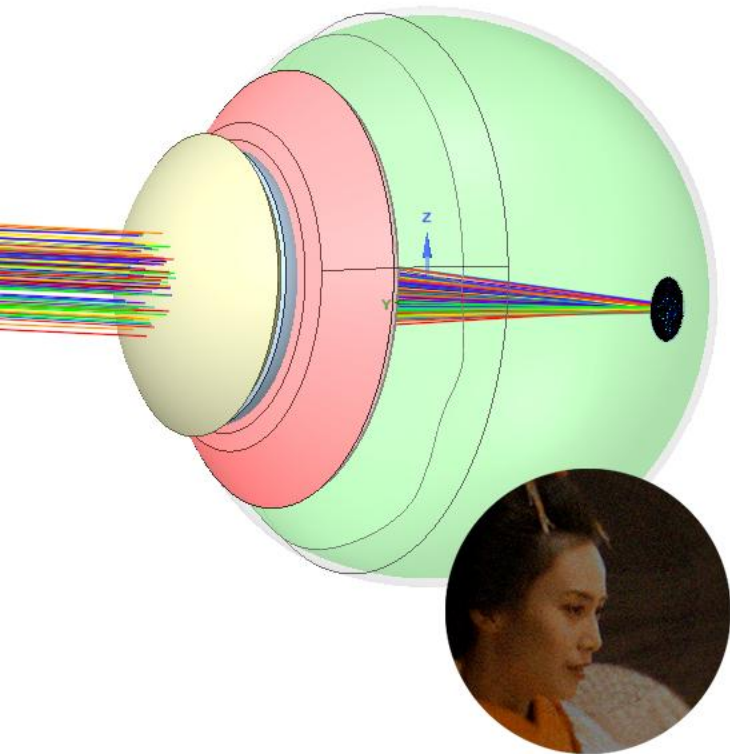


Power by ZhiWei Virtual Simulate Lab 2023-2025

人眼建模 → 光学仿真 → 视锥吸收 → 外段光电流 → Bipolar响应 → LNP管线 → RGC 脉冲&解码 → 视觉重建

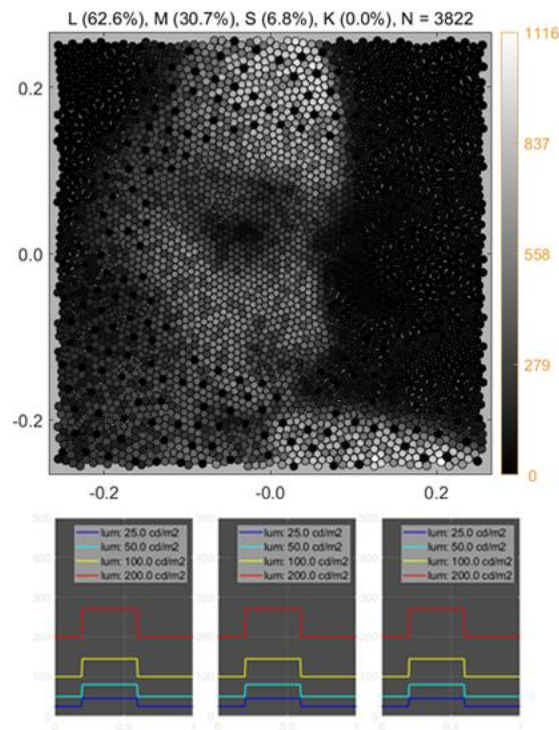
① 光学的

L 人眼建模
光学成像仿真



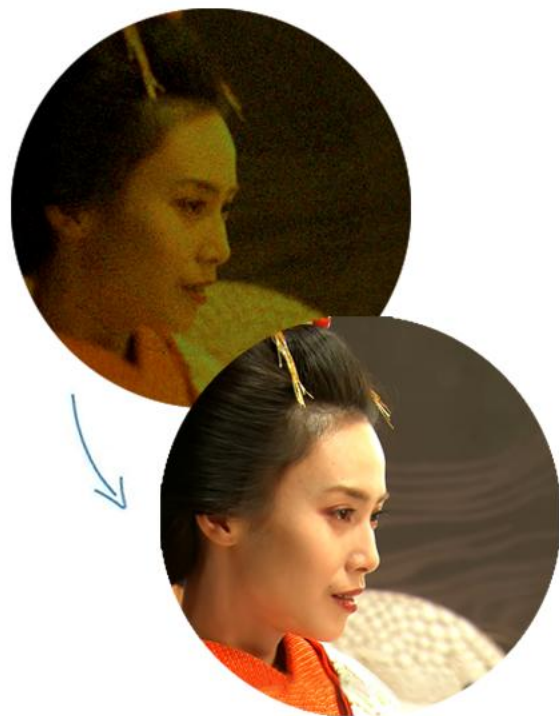
② 生物学的

B 视锥响应 & 眼动
外段 & 双极 & RGC



③ 神经学的

N 扩散模型重建主观视觉
Bayesian评分函数




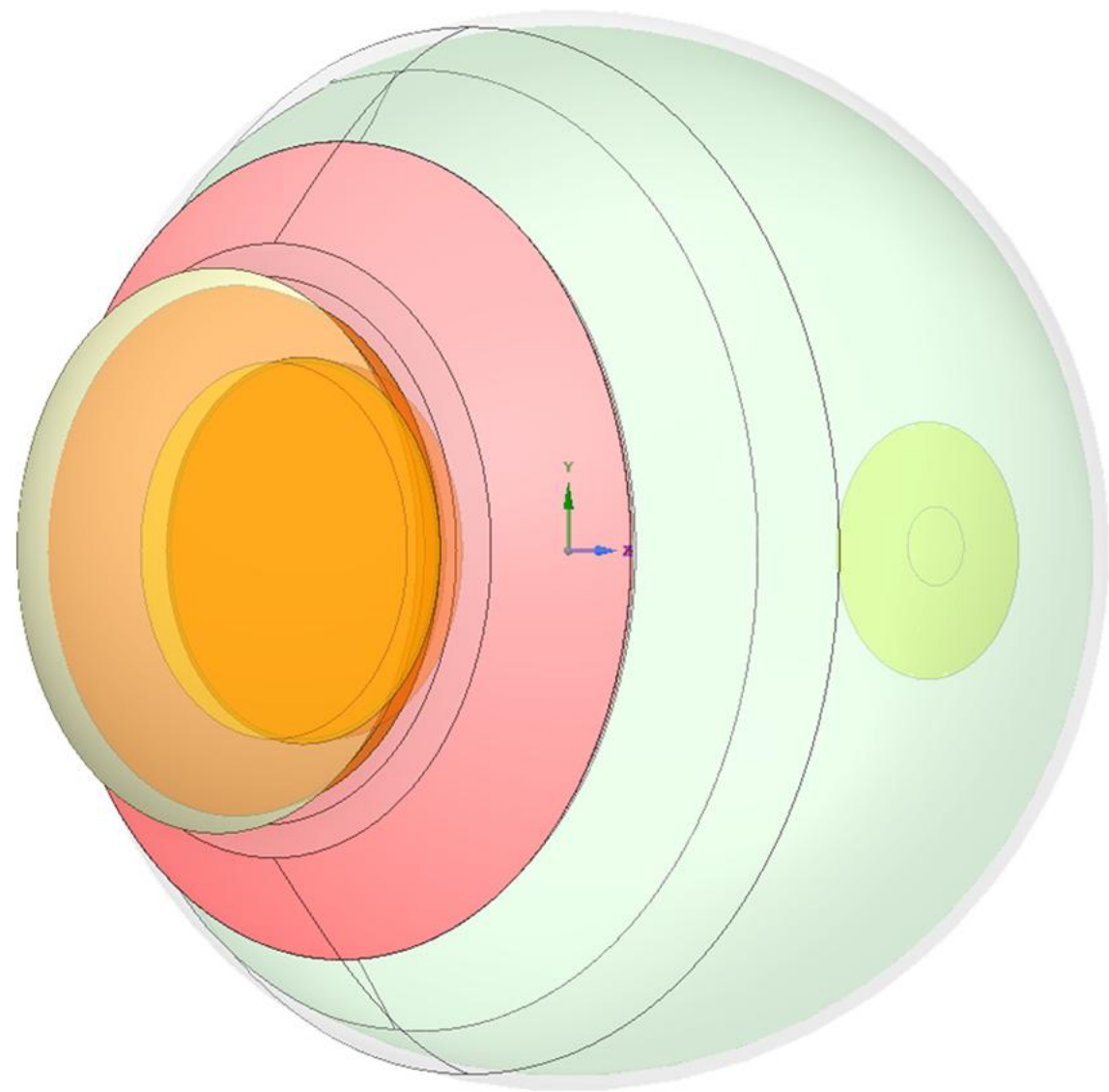
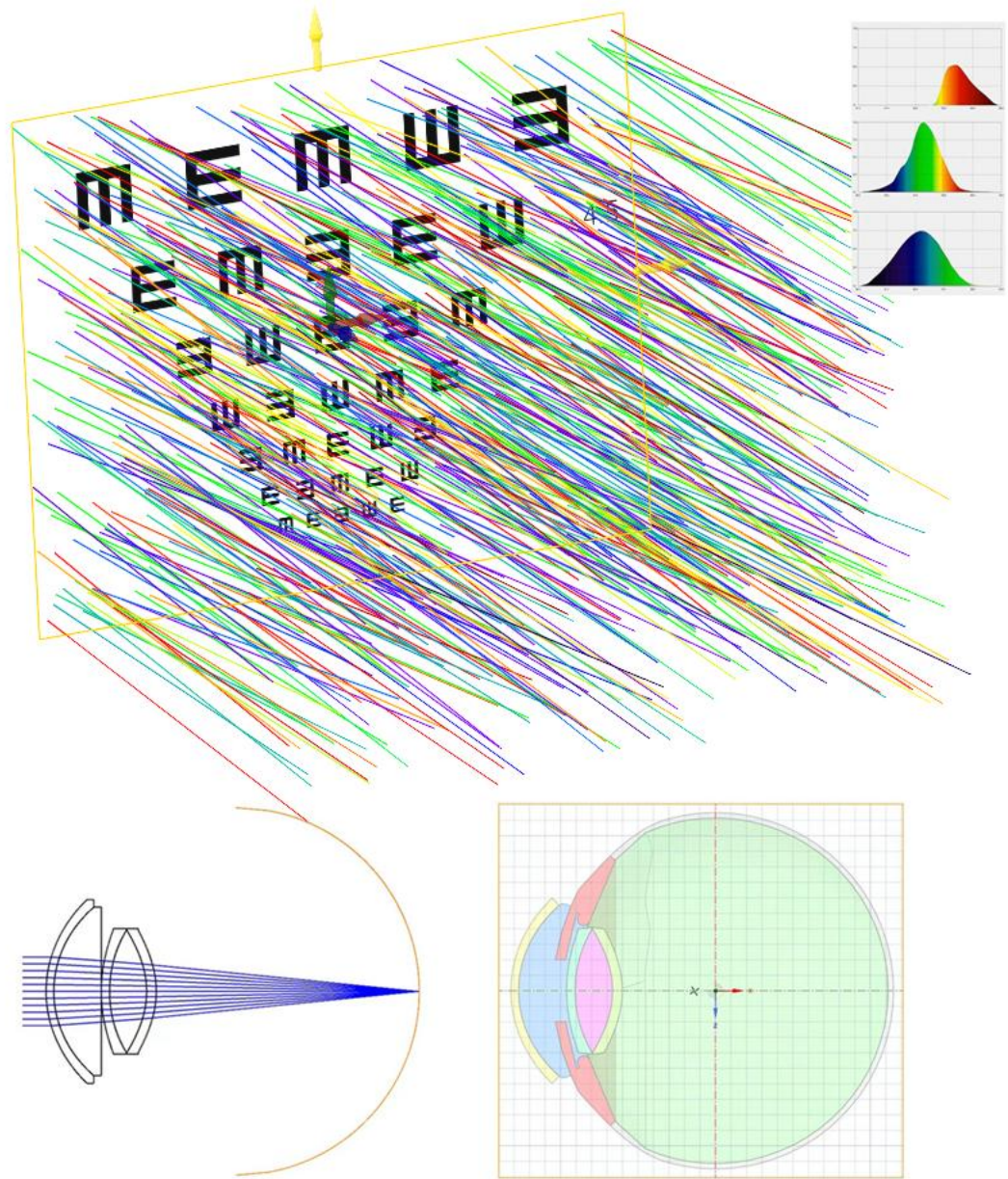


Part 1 /

眼视光学部

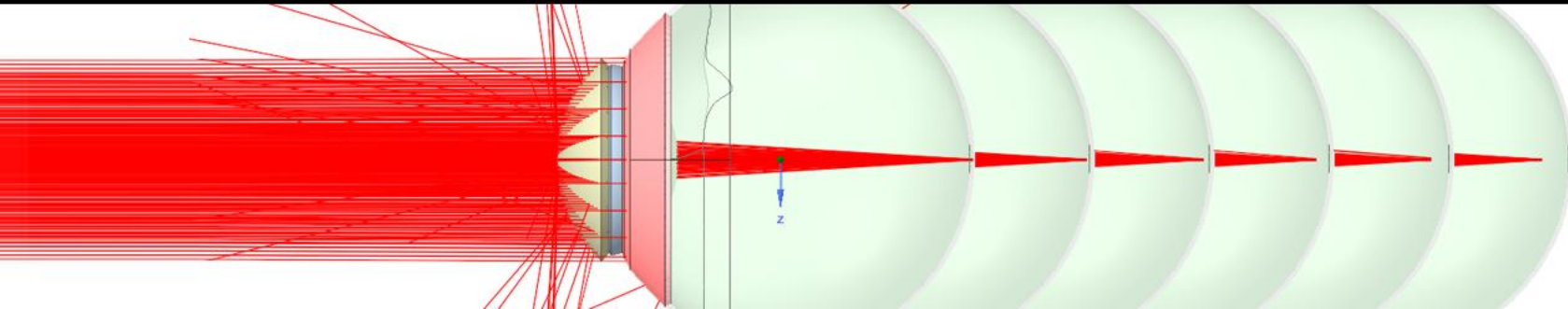
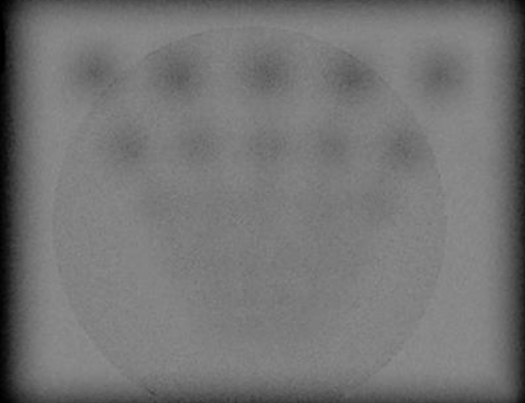
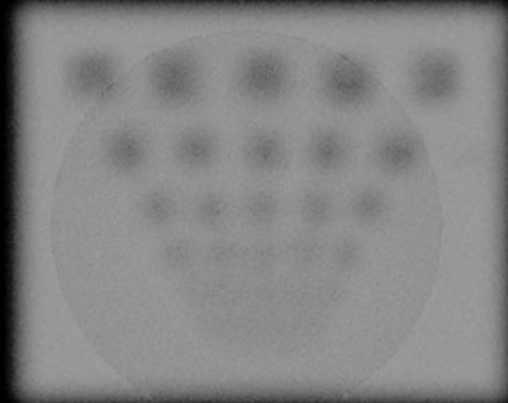
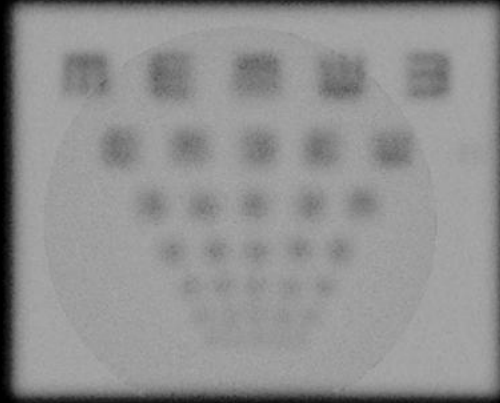
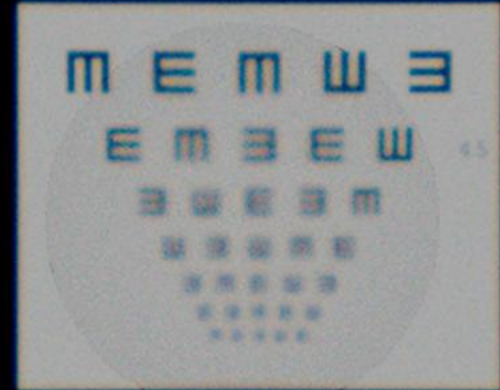
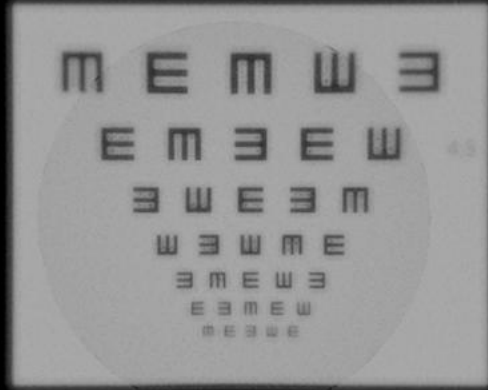
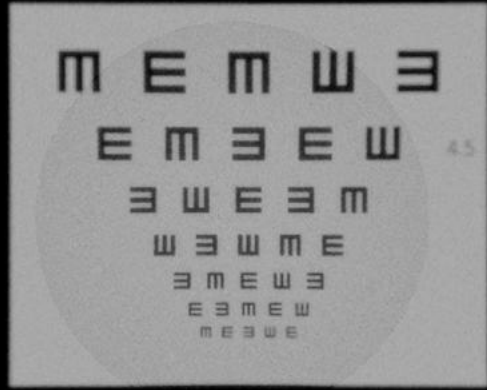
结构 | 仿真实例 | 讨论





* 本案水平达到国际照明委员会 (CIE171:2006) 测试案例评估。暂未有其他同例。

Refractive Error (D) 0.00 -1.00 -2.00 -3.00 -4.00 -5.00



仿真实例
不同度数的近视成像

Sph-2.00D+Cyl -3.00 (D) 0°顺规 90°逆规 45°斜轴 散光



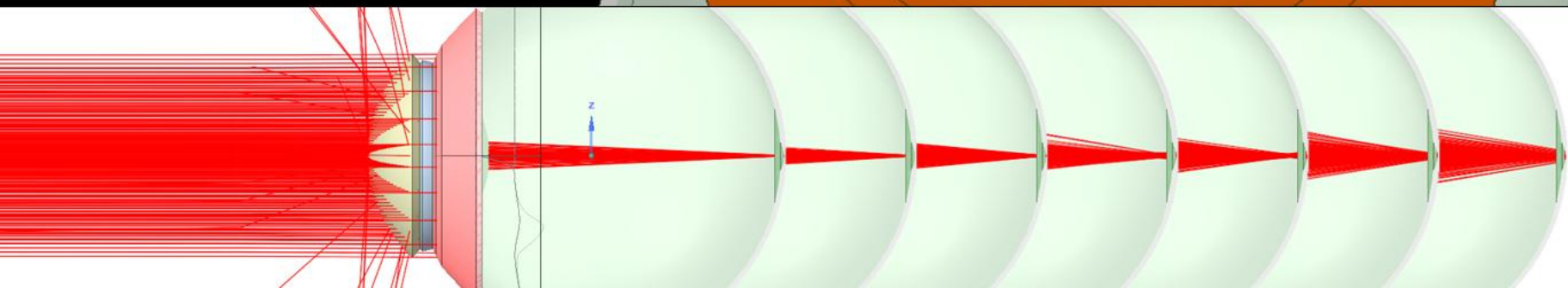
[讨论] 按 $SE = S + C/2$ ，以上等效球镜相同。但在视力表（E形、C型、威尔斯金蛋形）的表现差别很大。现临床/研究用的 Blur-Strength、Visual Strehl (VSX、VSOTF)、Orientation-Weighted MTF Area (AOMTF) 都不考虑视标的形状而仅基于PSF/OTF卷积，有待进一步研究（理应让积分权重随方向 θ 、频率 f 变化）。

仿真实例
不同轴向的散光成像

Pupil diameter (mm)

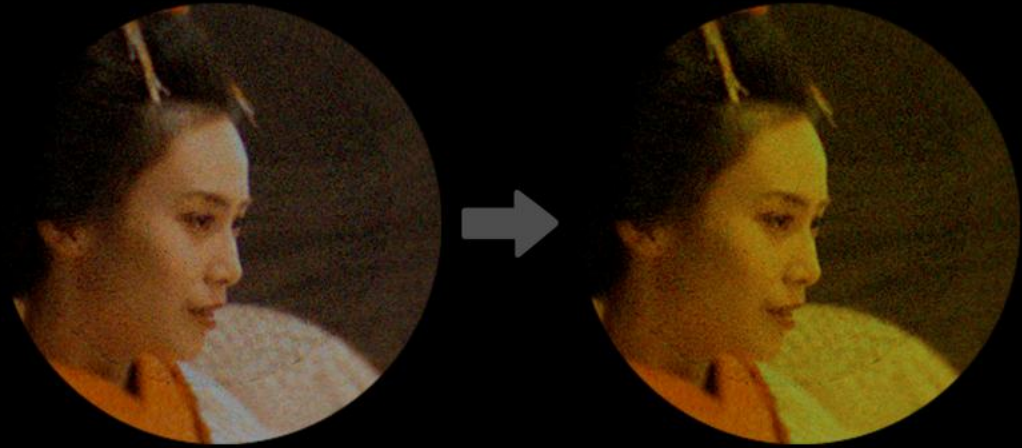
2 3 4 5 6 7 8

* 晶状体不参与调节的

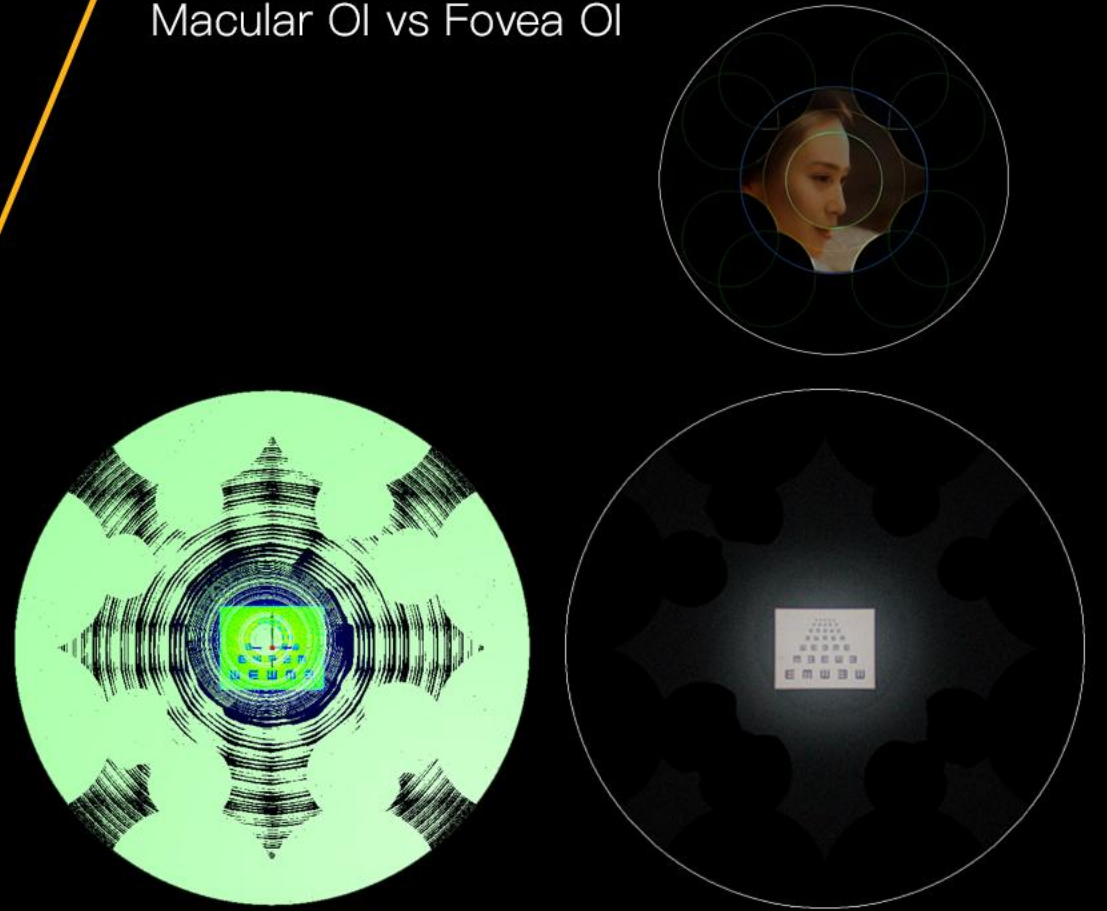


仿真实例
不同瞳径的像质

Macular pigment 光谱吸收



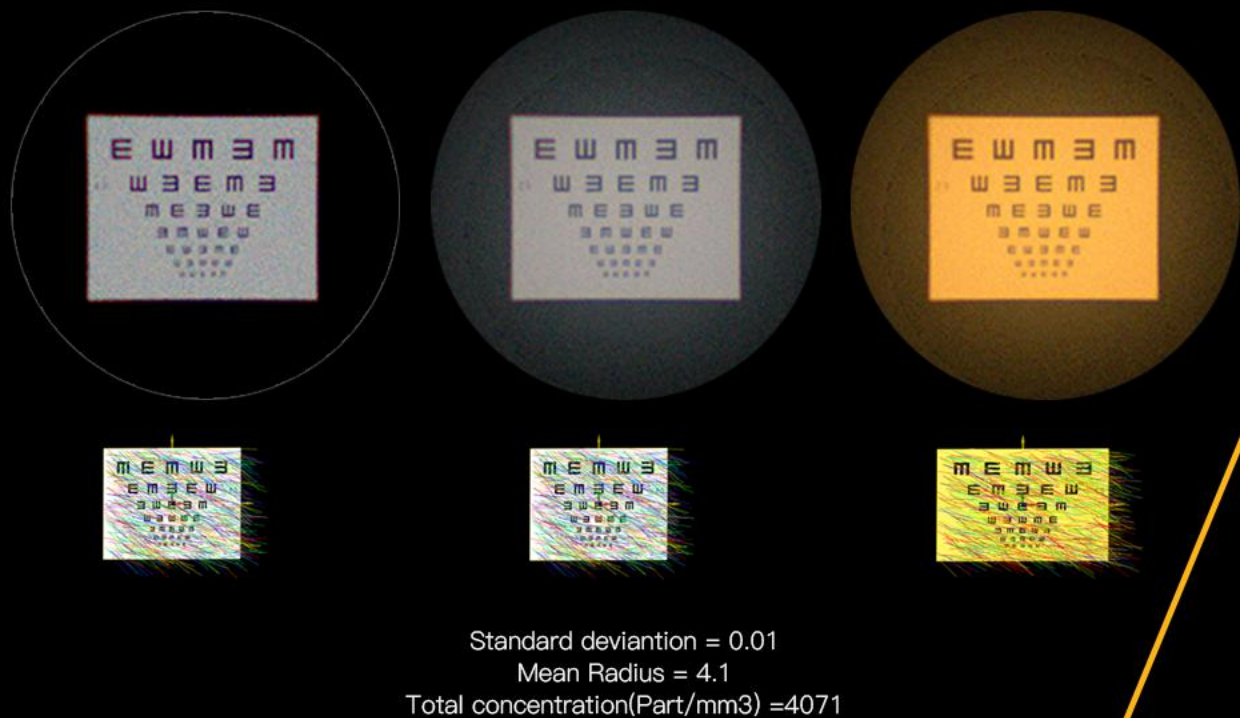
Macular OI vs Fovea OI



[讨论] 如上图右，我们观测到，当FOV大于中央凹区域时，出现了光阑（瞳孔）和球腔视场（脉络膜）联合造成的视场界限现象：超出中央凹的黄斑区部其成像是**不规则的**。这“物理光路上的成像截止”比“因分辨率下降而成像模糊”更基础、更重要！但在眼视光/生理视觉研究中尚未系统建模或文献归纳。

仿真实例
视网膜黄斑区与中央凹

晶状体 衍射 (白内障)



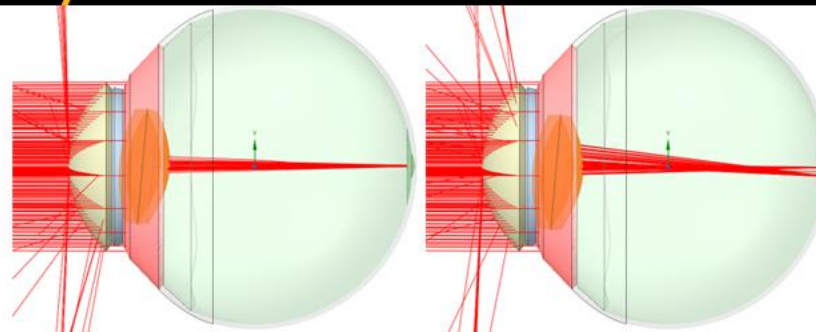
晶状体 倾斜 & 偏心



[研发辅助] 对白内障友好的 电子屏的阅读模式 & 医械级的 眼镜

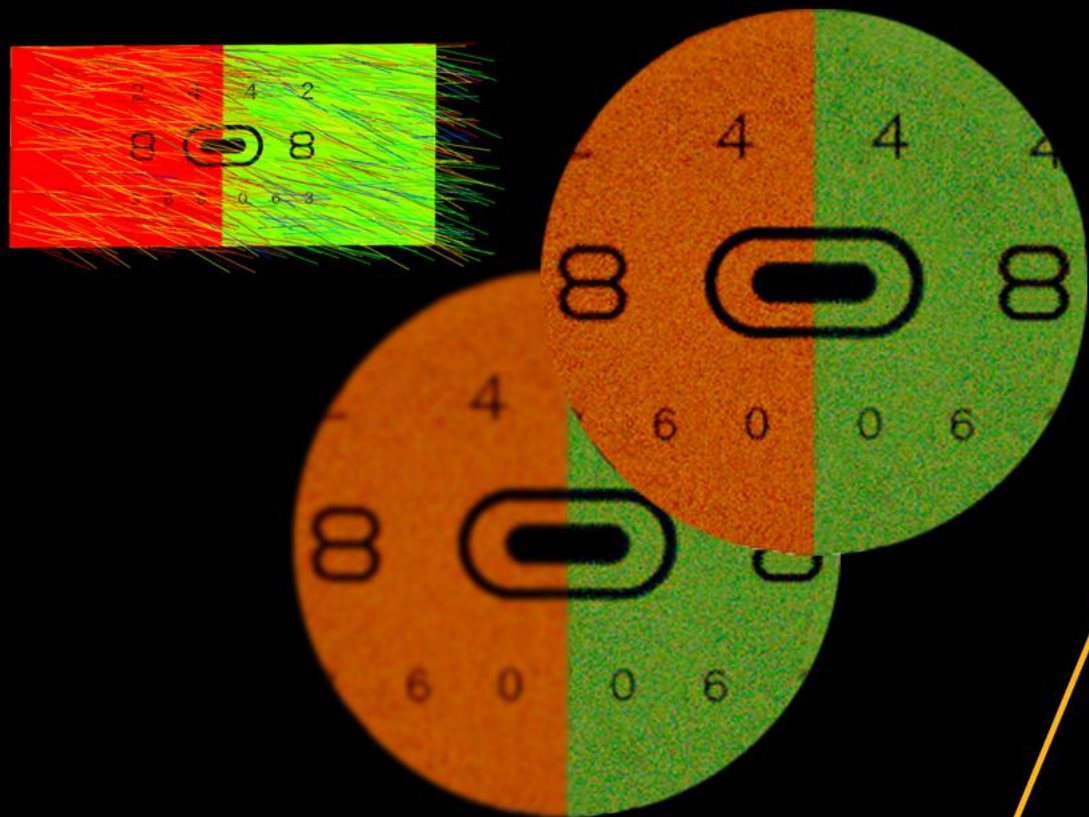
[研发辅助] 对老视更友好的 电子屏阅读模式

[临床辅助] 使用逆向光路法更快更准确地计算手术最佳切口

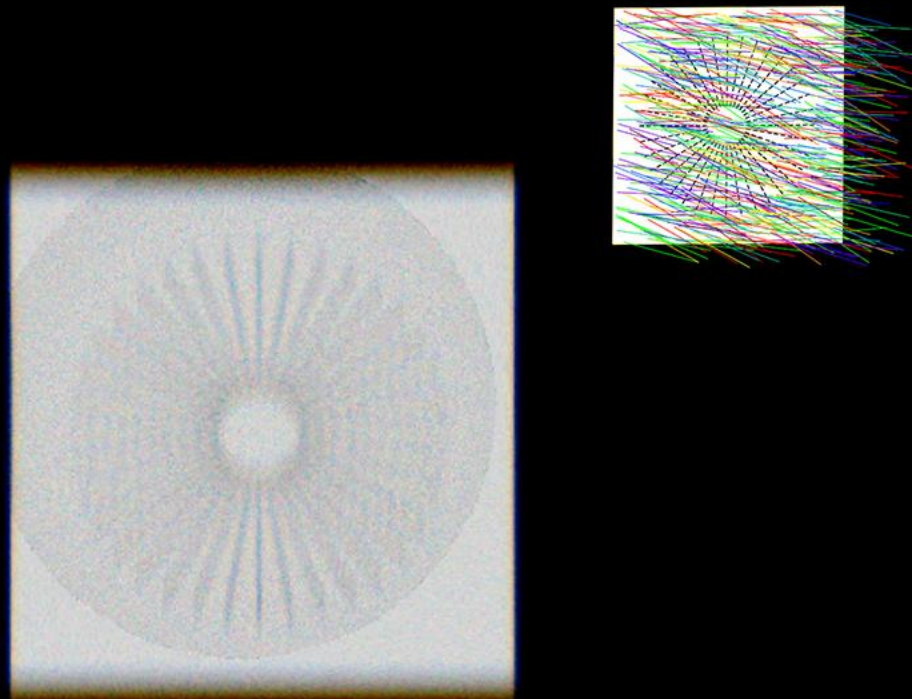


仿真实例
不同状态的晶状体

Duochrome 最小弥散圆(COLC)



明视距离边界 前焦线



[应用] 2024年8月，我们通过最小弥散圆和前焦线的距离实现柱镜度数的计算。同年10月，**哈佛医学院** Luo 等人在论文《Subjective Refraction Test Using a Smartphone for Vision Screening》发布了相同原理的方法。借助仿真，我们为受试者实现在双色测试中“红绿色达到同等清晰”和散光盘测试中“某方向出现清晰的实线”的主观认定和仿真实况（理论结果）交叉印证、主客观对齐。效果更佳。

仿真实例
散光自主量化测量

青光眼 管状视野



Normal

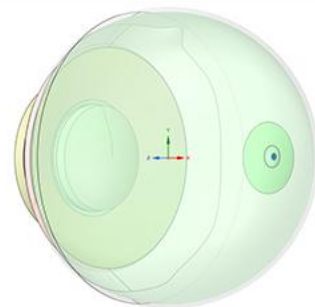
VS



Glaucoma
FOV<20°

[应用] 我们将黑白交替的正弦条纹光栅以25-50 Hz频率在手机屏幕上显示，实现倍频视野检查法（FDT）。通过视觉仿真引擎模拟不同屏幕与距离下不同cpd的条纹效果，设计行为学验证实验（主观反应 + gaze tracking）评估是否诱导感知偏移，去实现准确的大规模低成本快速青光眼筛查。

至此，我们报告了仿真引擎光学部分的一些实例，相比广阔的应用空间，这只是小小的开始。同时，也可以看到，人眼的光学性能极其有限，成像与主观视觉有着明显差距。为此，需进入引擎的生物学和脑经科学部分。



仿真实例
在手机实现FDT



Part 2 /

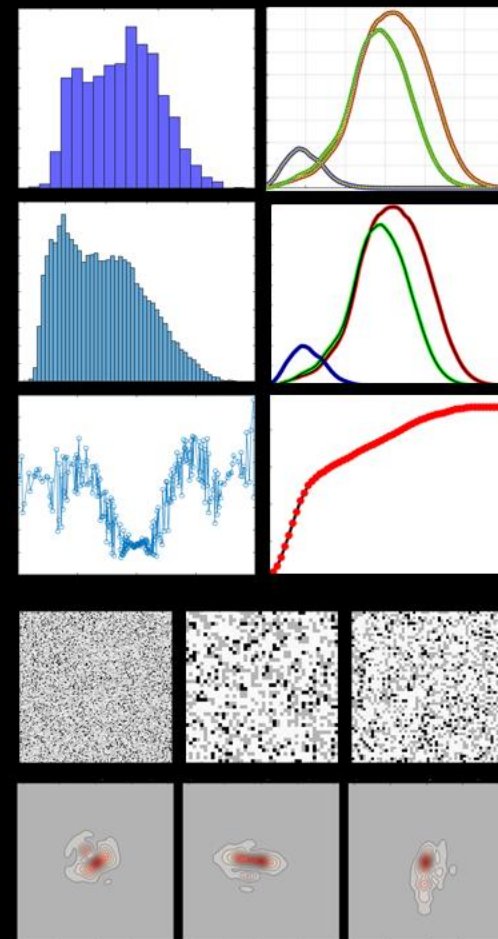
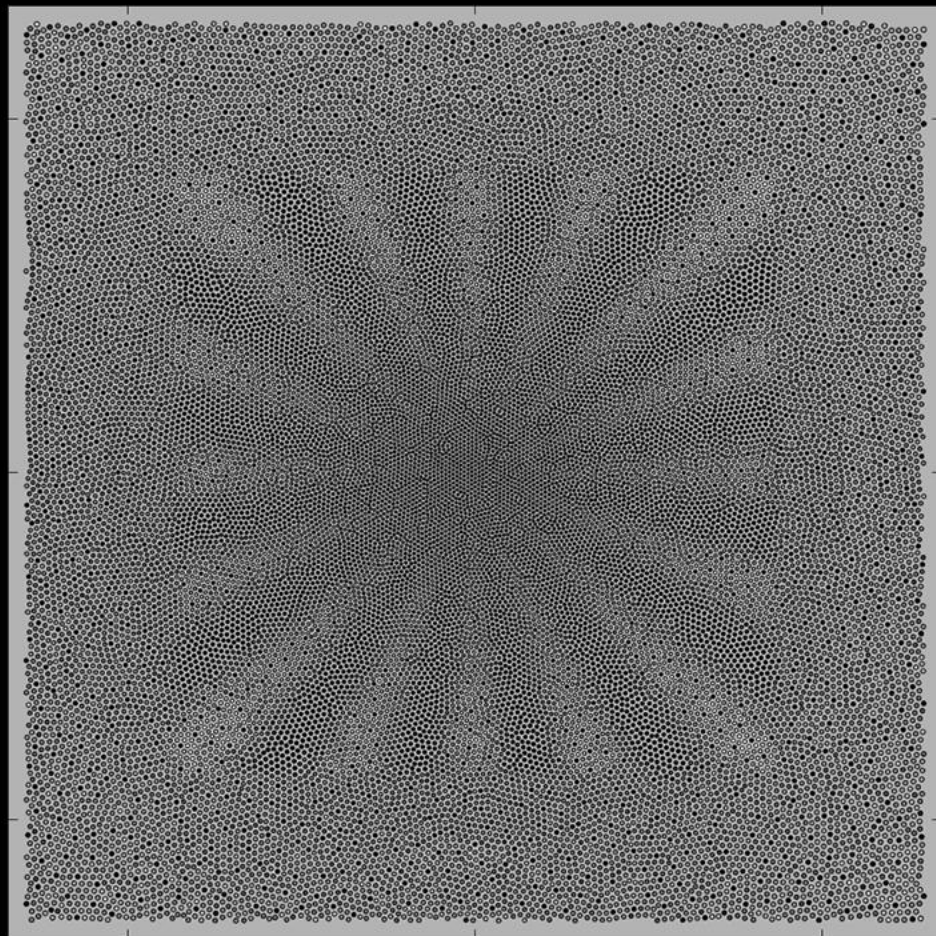
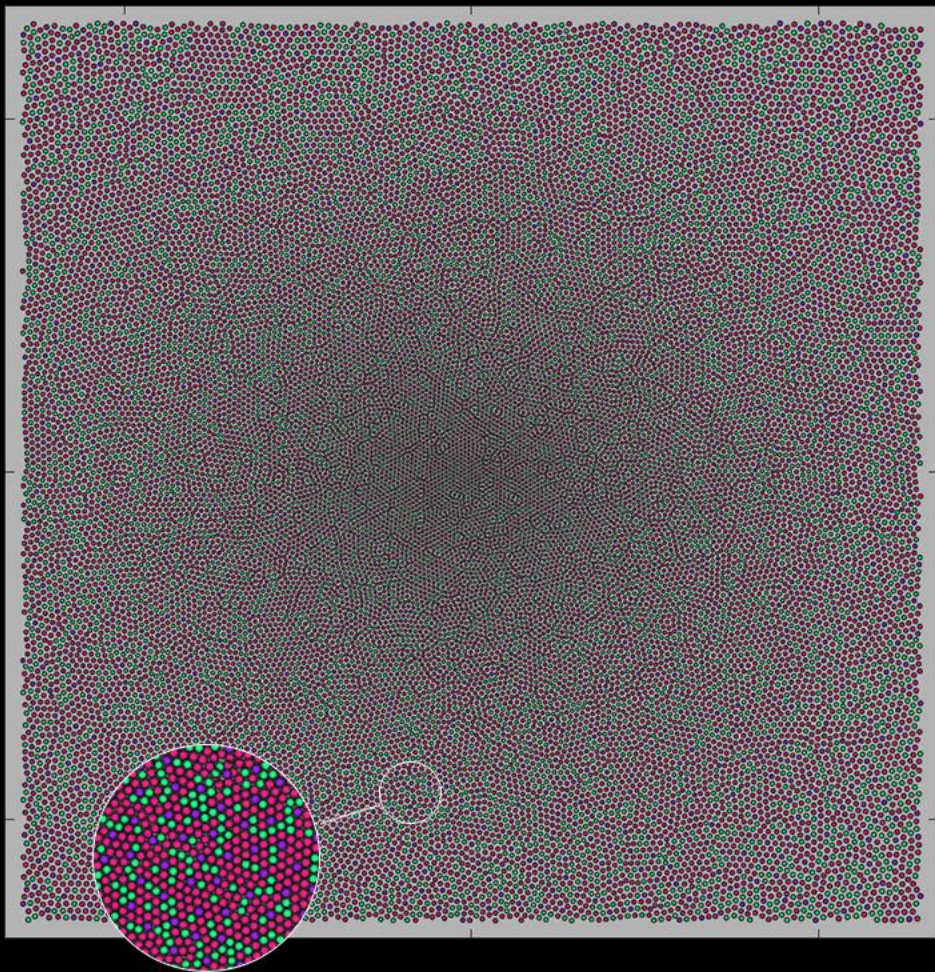
生物学部分

视锥吸收 | 光电流 | RGC 脉冲 | 解码



L:M:S 比例 L (60.3%), M (30.3%), S (9.4%), K (0.0%)

随偏心率的梯度密度 放射状



Mosaic 构建融合了解剖数据 (Williams, Cooper)、类型分布 (Hofer) 和光谱感受 (Stockman)，是一个结合多位视觉科学权威成果的综合性和马赛克建模平台。其基础已在多个顶级视觉期刊中得到实验验证与理论支持。同时引擎将世界首次创建了双弧面结构的视锥马赛克，以及各位置视锥分角度的受光权重。

视网膜
视锥&马赛克

1 图像的R/G/B分通道仿真



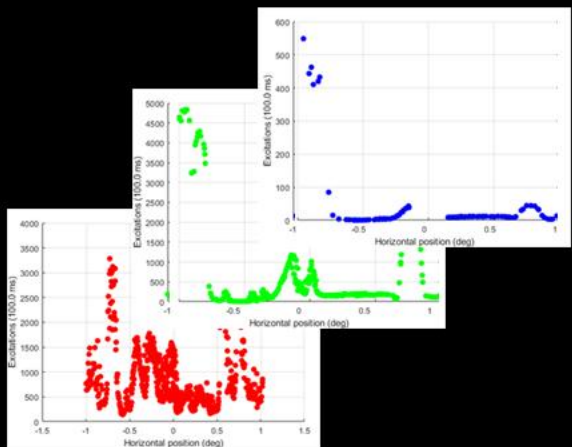
2 光学仿真图和3个通道的辐照度data



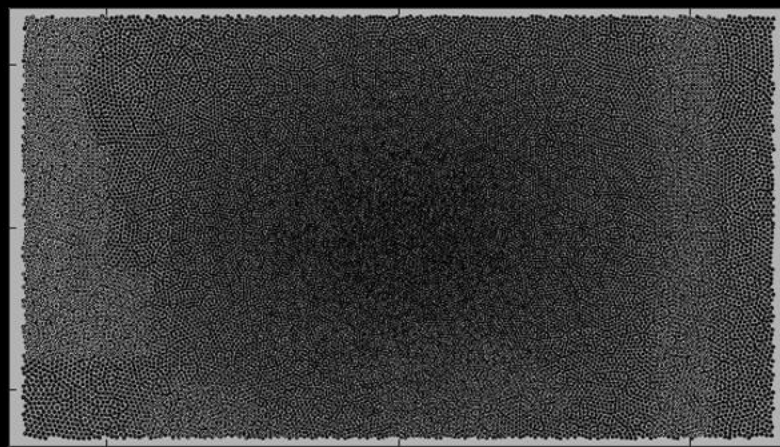
3 黄斑色素滤波后的视网膜光学成像OI



6 L/M/S的激发分布



5 M视锥的总吸收热图



4 OI的LMS视锥马赛克网格coneMosaicGrid



从光学成像到视锥马赛克的吸收过程繁杂涉、专业度较高且可视化内容较少。篇幅所限，略去视锥马赛、和PSF卷积等环节和详细的介绍。

引擎的视锥马赛克结合光学仿真中观测到的光阑和球腔的物理截限现象，应该对赋能人造视网膜的研发有重要意义。

视锥激发
L/M/S 吸收点阵

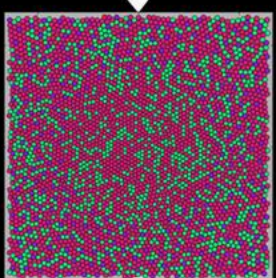
1 OI



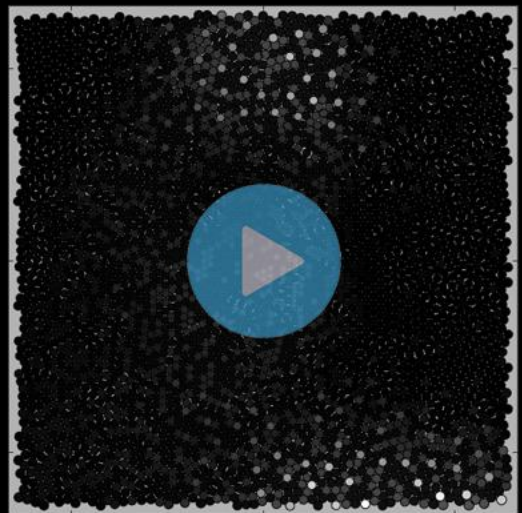
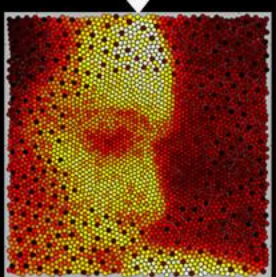
2 快速验证



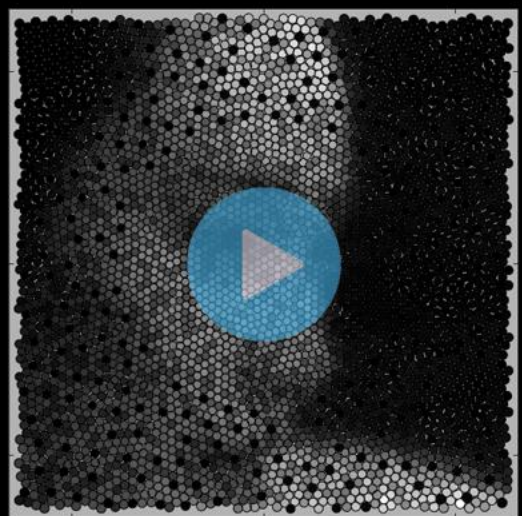
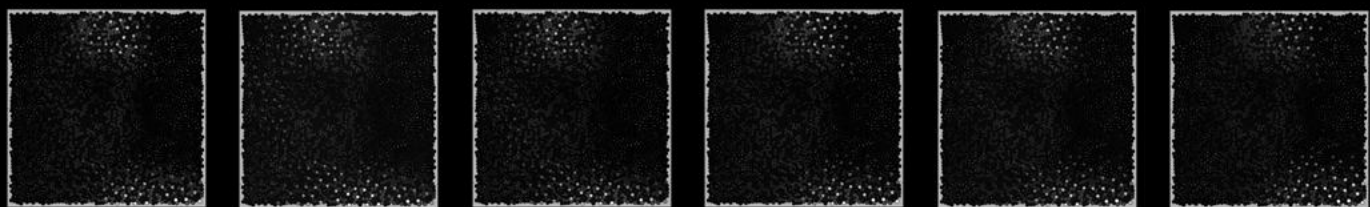
3 cMosaic 加载



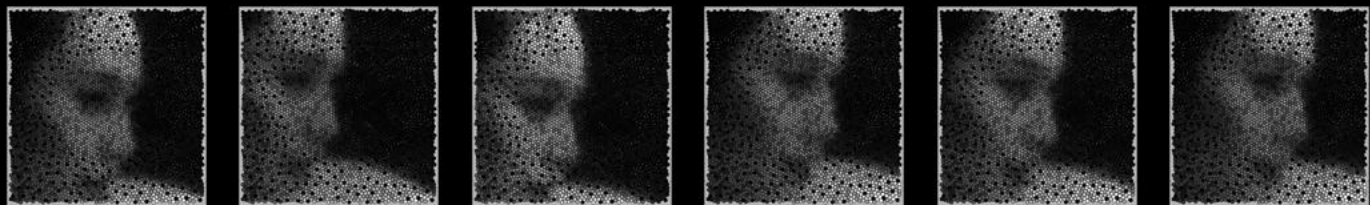
4 L/M/S 吸收帧



5 时域微扫视 >>



6 光电流 >>



漂移：持续、低速 ($\approx 0.1-0.4^\circ/s$) 的随机漫步，让视网膜采样窗口在中心凹内缓慢滑动,有效抑制光感受器适应并提供亚像素级超分辨采样。

微扫视：用统计分布随机生成间歇的快速跳动 (幅度 $0.1-1^\circ$ ，峰速 $> 30^\circ/s$)，周期约 $0.5-2$ s，一次性把视标重新定位到注视中心附近。

注视的眼动
微扫视/漂移

1 Scene图像



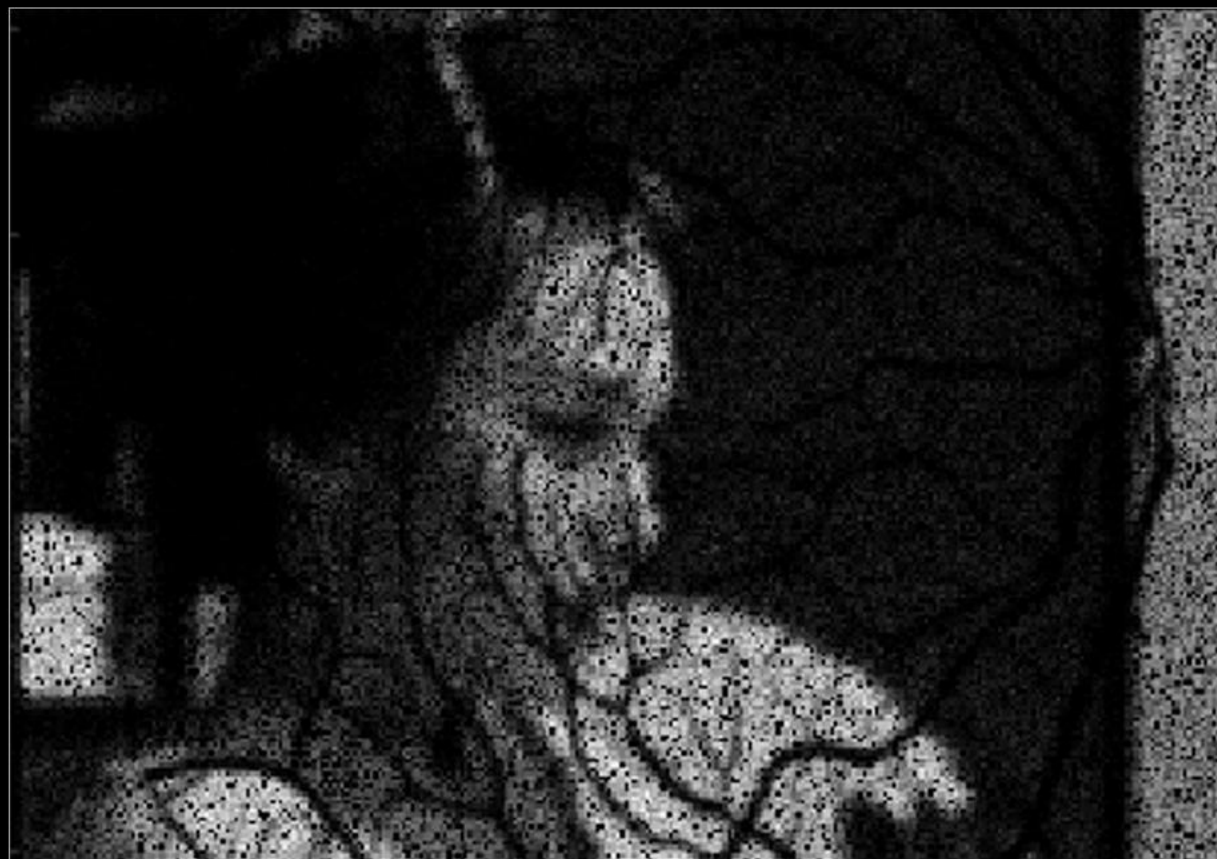
2 视网膜OI



3-a 血管遮挡 (小FOV)



3-b 血管遮挡 (大FOV)



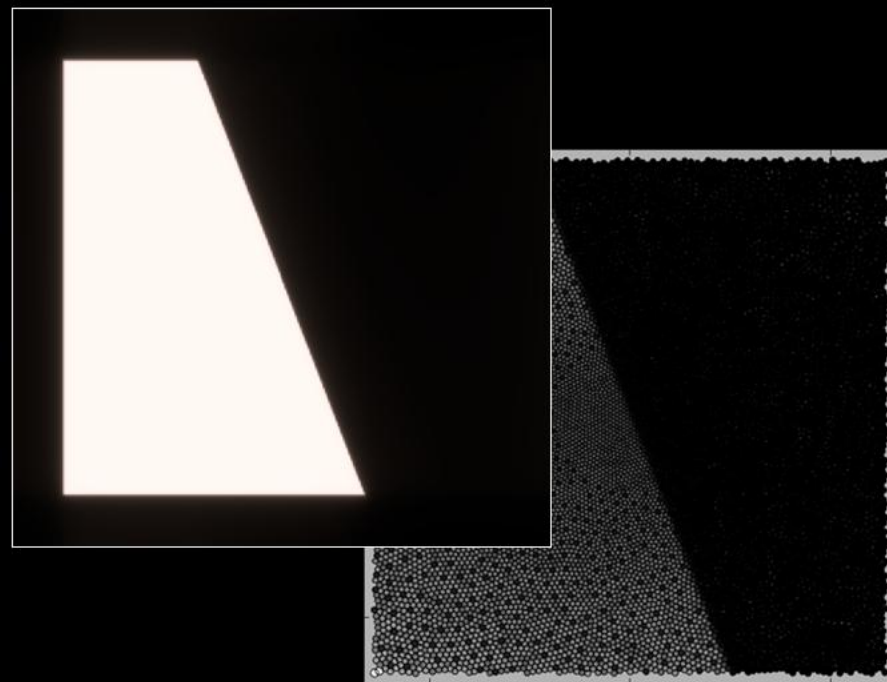
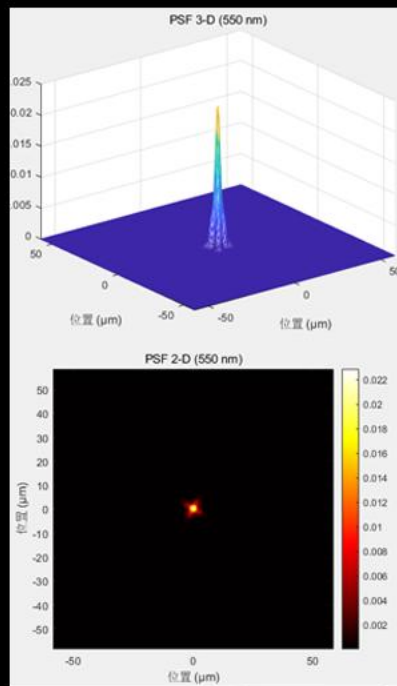
真各种眼底实况，获得更真实的光捕获分布：一般及特异的（中心凹缺血、黄斑水肿、中心性渗漏、激光瘢痕、血管阴影、白内障斑点、青光眼孤立斑、可变透过滤光片、散粒噪声.....）。可为“训练学习眼底影像分析→提供诊断建议”的 AI 提供视觉主观评估的标签数据，助力 AI 迈向更有临床价值的“视觉功能预测”。也对考量 **人造视网膜** 电极孔的位置和影响有直接价值。

黄斑区
眼底特异

1 波前像差仪/角膜地形仪等设备导出数据



2 一键导入，即时获取可视化的PSF、成像和激发分布.....

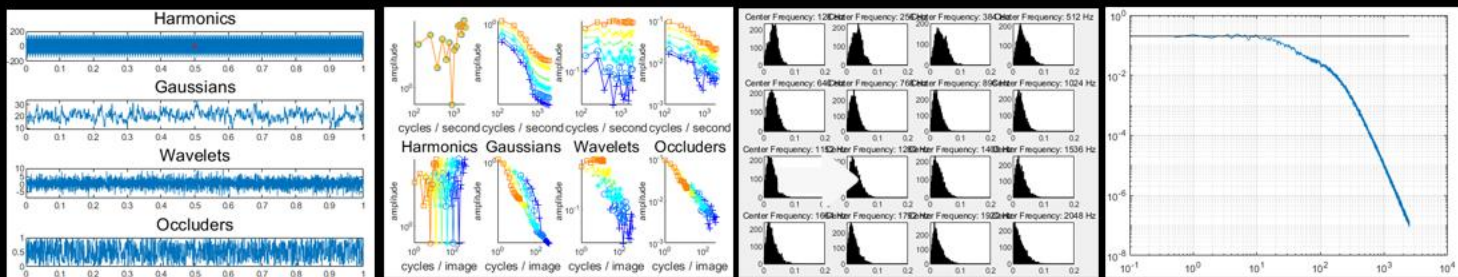


让医生和研究人员“看见”像差和像差对视觉质量的真实影响。赋能屈光手术评估、视觉矫正方案仿真，AI 模型训练。

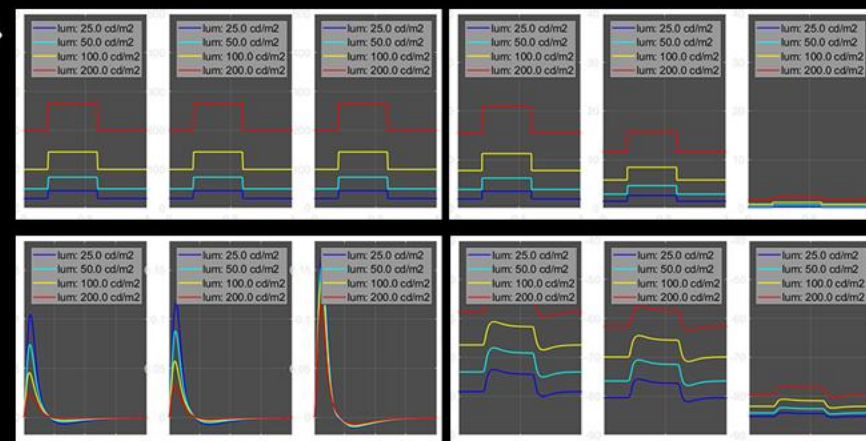
让波前像差仪、角膜地形仪、眼底相机.....从单机医械跃升为计算视觉数智未来的关键入口。

“看见”
让医械更聪明

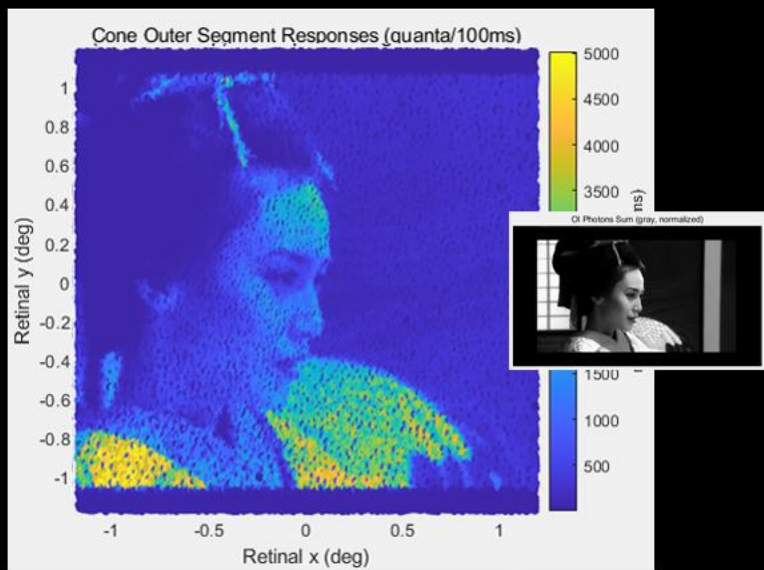
1 节外噪声 和 在一维空间的分布



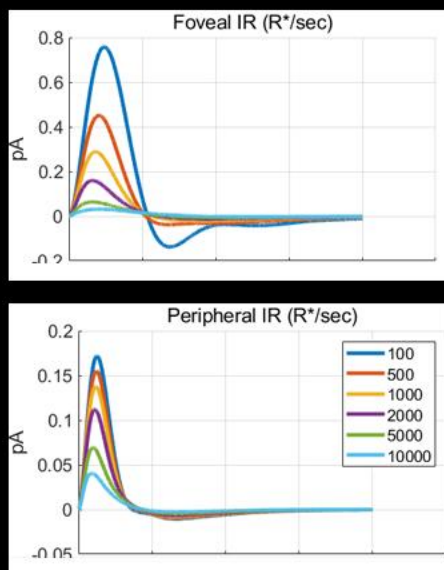
2 光电响应 线性滤波器



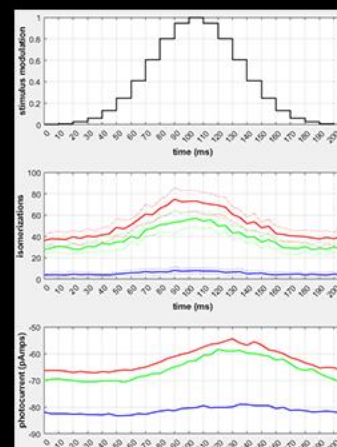
6 可视化外节响应



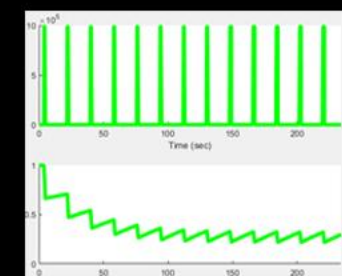
5 响应电流线性化处理



4 综合响应 (光敏色素/眼动/时间)



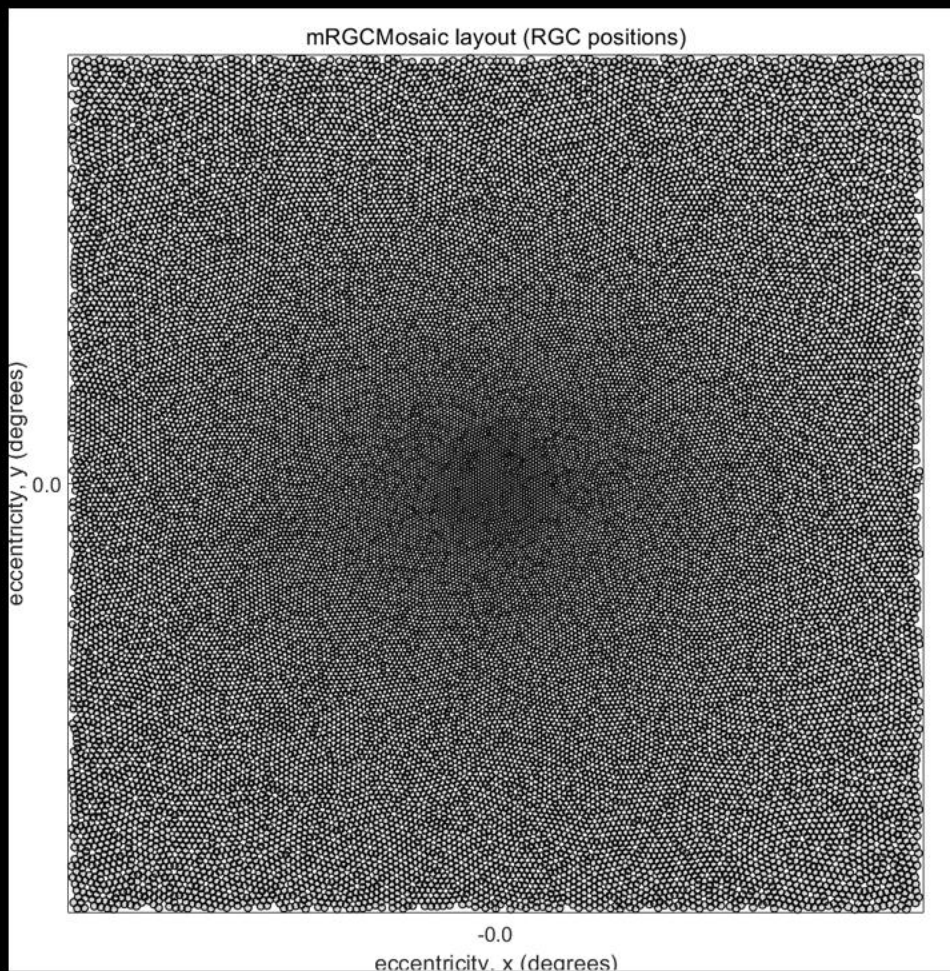
3 强光漂白&黑暗再生



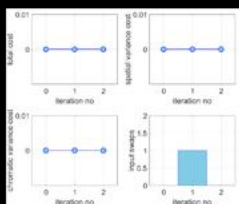
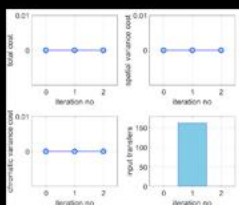
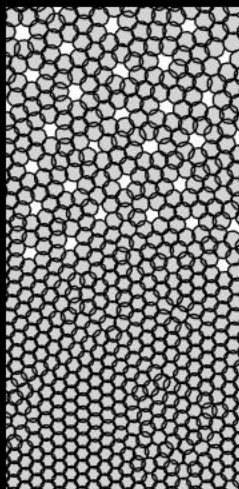
包含光漂白、噪声、时间滤波、暗电流等生理过程。外段的光漂白 & 暗电流噪声是 RGC 信噪比的硬底噪声，决定光信号“原始模版”与物理极限噪声。外段电流对背景光有 log-型自适应，影响后续所有级增益。

**光感受器外段
光电流机制&处理**

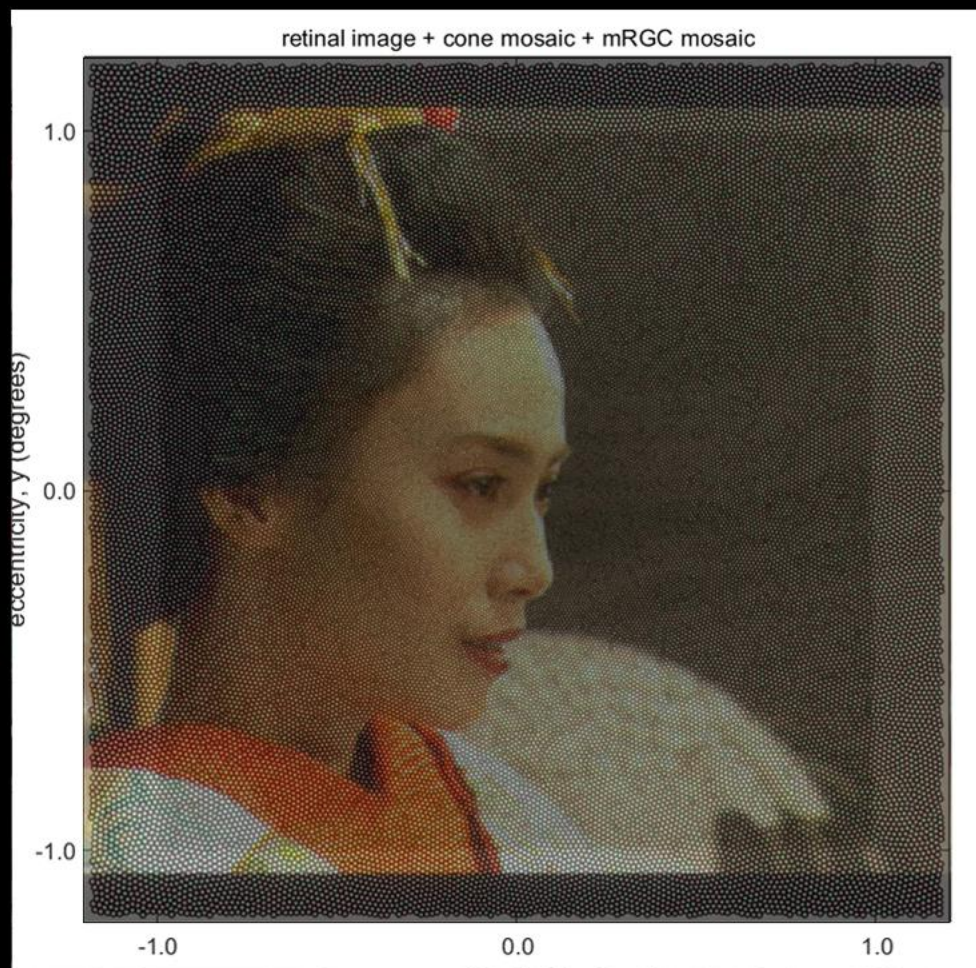
神经节细胞RGC马赛克 [2 x 2]



局部



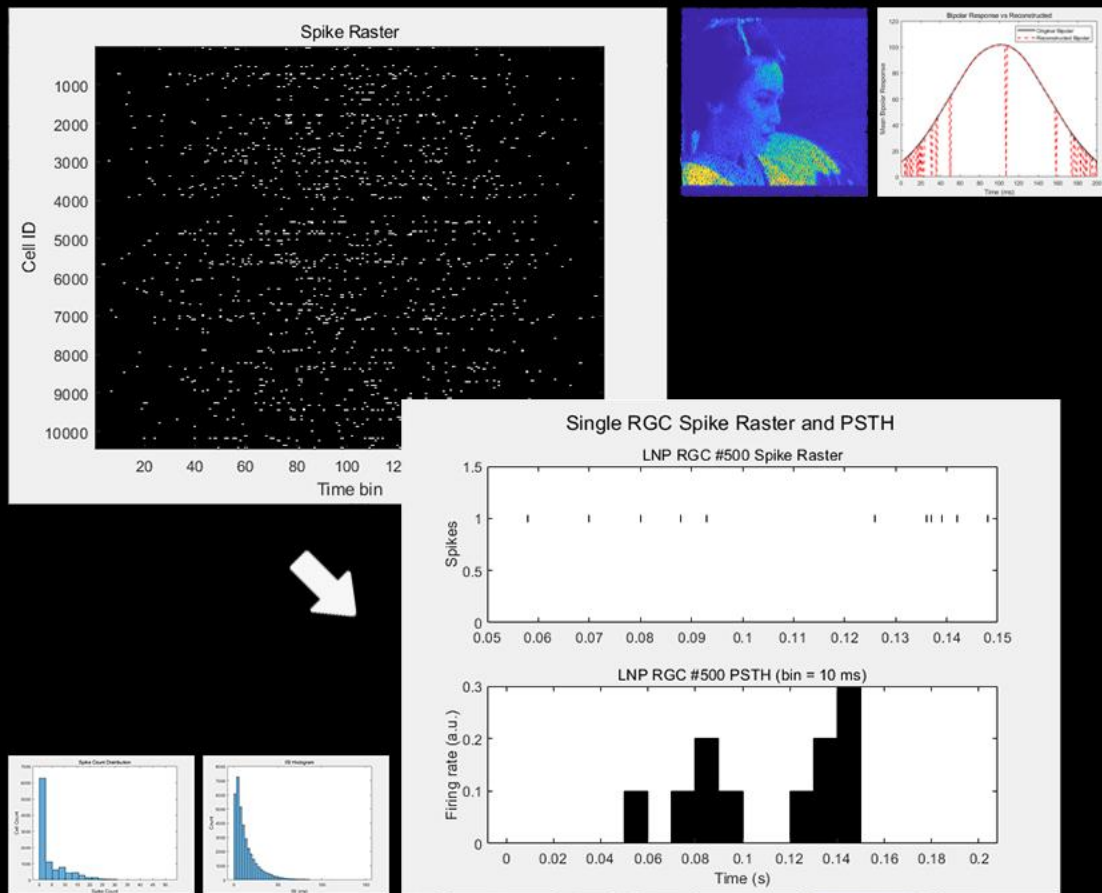
视锥+RGC的感受野轮廓 * 可视化演示, 物理上非本形式



融合视网膜解剖学 (RGC 密度、空间排列)、生理学 (中心-周围感受野)、视锥-RGC 信号池化、以及噪声与时域动态响应模型, 符合已有文献实验的RGC Mosaic。接受来自视锥马赛克的输入, 计算视锥吸收 ($\Delta R/R$) midget RGC层的响应, 输出 ($nRGC \times nTimeSteps \times nTrials$) 的 电流矩阵/Spikes。

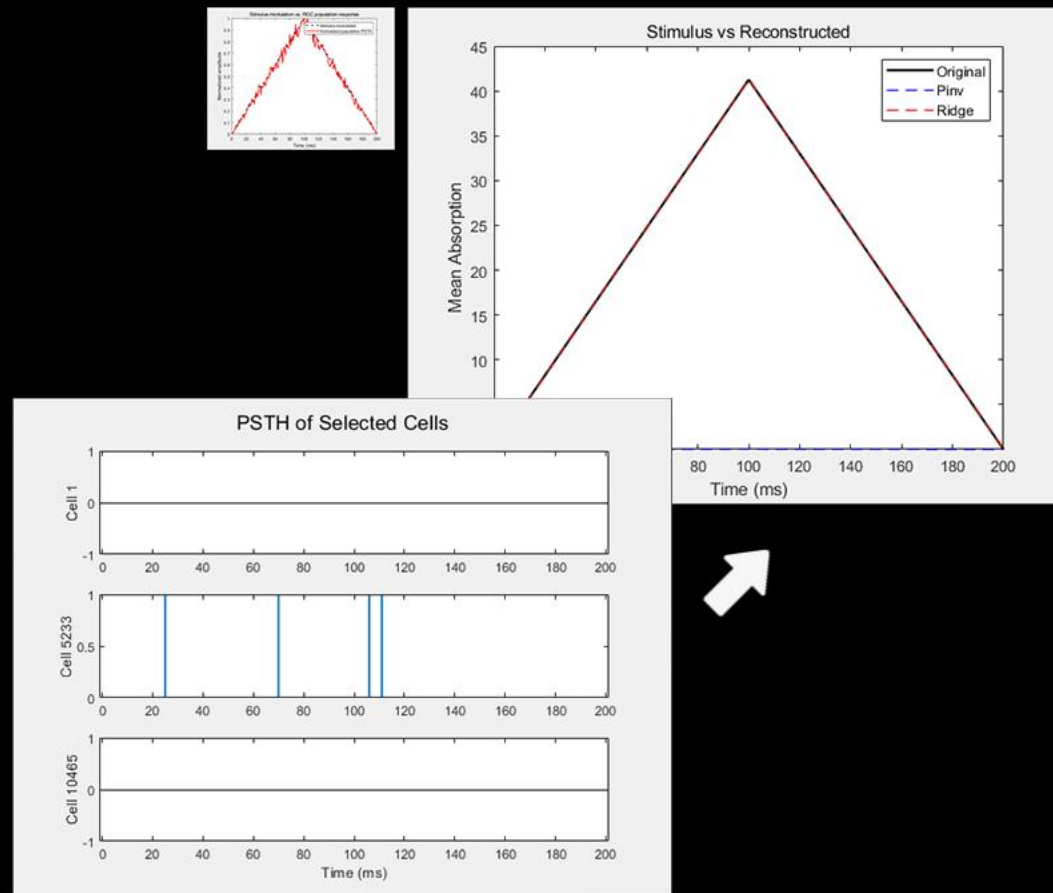
视网膜神经层
RGC马赛克

1. 放电Spikes 整体神经节细胞脉冲栅格 (经Bipolar Response vs Reconstructed)



3.LPN 单个RGC的LNP放电与PSTH

4. 重建Reconstruction 刺激 vs 重建曲线



3. 编码Encoding 选定RGC群体的PSTH&脉冲统计

包含 (1) 双极细胞bipolar对光感受器输出的时空整合与非线性响应； (2) 神经节RGC部分的工作流程从群体放电的定量统计、单细胞时序分析到基于脉冲数据的回归解码，揭示RGC对时变刺激的编码特性及基于稀疏放电的刺激重建能力。简言之，这就是 **人造视网膜电极发射** 和 **视觉脑机接口输入侧** 的 **神经信号脉冲编码**。

视网膜神经层
Bipolar /LNP/RGC



Part 3 /

脑经学部

主观视觉 | 扩散模型 | 视觉重建



光学生物学成像 vs 主观感受成像

视场裁切、色彩偏黄
低分辨率、噪声斑点

视场完整、色域完整
清晰稳定、锐利通透



VS



「原因」 大脑在主观感受成像中起重大作用
知觉补偿：时域过采样；颜色/明度恒常；视觉皮层重建
「」 大脑先验：边缘连续性、物体语义、纹理填补

引擎策略：视觉重建

模块A 扫视 & 融像

输入：一般扫视轨迹的多帧序列
配准：光流/特征匹配校正
融像：空间拓扑和对抗式深度学习

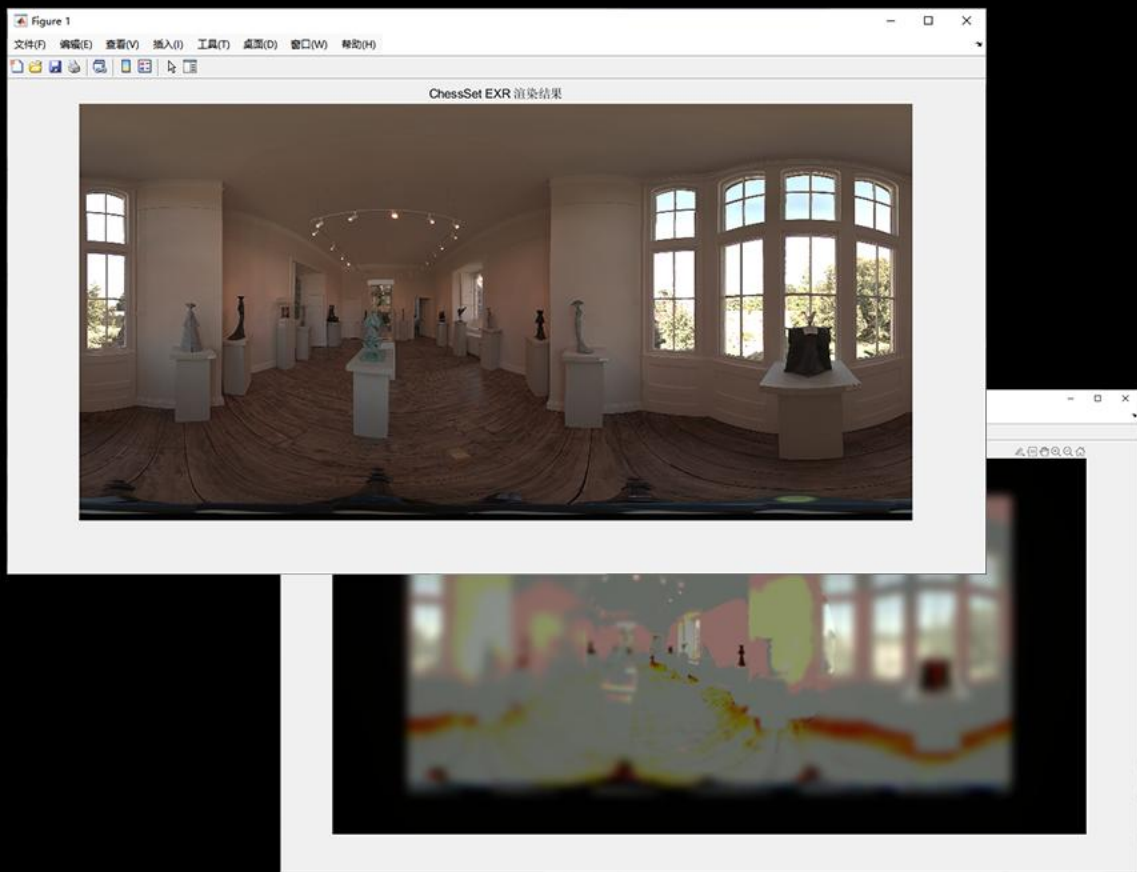
模块B 扩散模型重建

核心：UNet-based DDPM
+ Retina Encoder
+ ScenePrior Transformer

深度学习和扩散模型之前，受限于噪声模型与感知先验，眼科与计算机视觉领域一直未能把碎片化、低信噪的“真实输入”还原为大脑主观看到的完整画面，只能局部锐化。扩散模型突破了这一瓶颈，将“看见”过程从光学到意识完整模拟，为医学影像增强、视觉辅具乃至脑机接口打开全新可能。

概述
主观视觉

注视点驱动黄斑区多级模糊 & 扫视动态渲染



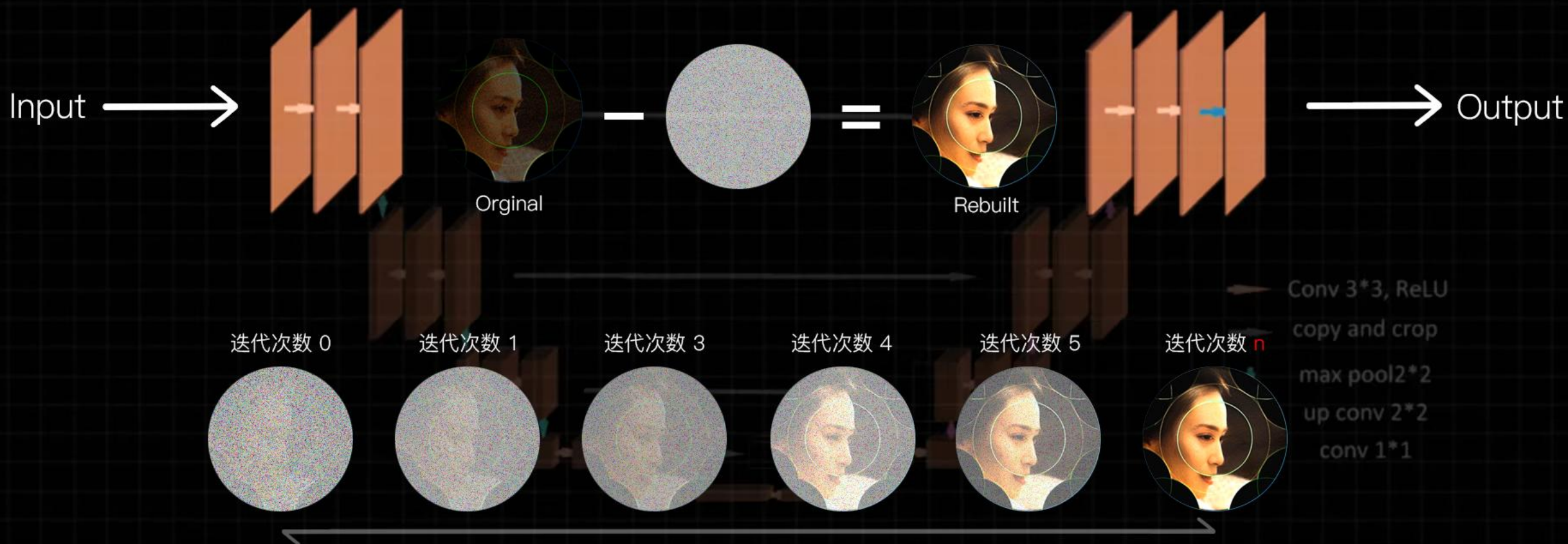
Demo视频
抽帧演示



引擎模拟中央凹清晰、周边模糊的感知机制。读取真实或合成的眼动轨迹，依据注视点位置进行多分辨率金字塔模糊处理，实现随注视点移动而动态调整的空间清晰度分布，仿真人眼的扫视过程，支持读取高动态范围全景图，并进行 gamma 校正和亮度调整。为训练AI进行融像提供数据集。

扫视&融像
扫视demo

David C. Knill & Dale Purves, Zemel, Dayan, Hinton, Karl Friston, Yuille & Kersten等权威学者均认为视觉机制是对概率先验进行Bayesian推理。形成现代术语：Bayesian Brain Hypothesis
扩散模型U-net的核心（Score Function）便是Bayesian函数



米开朗基罗：“雕像本来就在石头里，我只是把不要的部分去掉。” U-net：“图像本来就在噪点里，我只是把不要的噪点去掉。”

上方的生成图由引擎的U-net模型训练生成。模型构建正持续进行中，拟建成U-net based DDPM + Retina Encoder + ScenePrior Transformer

综合模型。我们认为：模型最终所得贝叶斯函数对人造视网膜、视觉脑机接口的研发有基础性作用。

从前沿到更前沿
主观视觉重建

视觉仿真超级引擎VSSE 是涵盖光学仿真、生物学数字孪生、人工智能模型的，面向“人类主观视觉重建”的跨学科、全链路、多维度的，提供在线服务的集成平台。

期望引擎能够服务于眼视光学专业师生、科研工作者、产品设计人员。期待能为视觉辅助产品的研发，甚至为人造视网膜、脑机接口、机器人视觉发挥作用。推动建立以人类视觉系统为蓝本的可计算表达和智能感知平台，推动视觉科学的研究。

